

## Cuantificación mediante relación señal-ruido de técnicas de procesamiento en termografía infrarroja activa

### Signal to noise ratio quantification of active infrared thermography data processing techniques

Rafael HIDALGO-GATO<sup>(1)</sup>, Jose R. ANDRES<sup>(1)</sup>, José M. LOPEZ-HIGUERA<sup>(1)</sup>, Francisco J. MADRUGA<sup>(1)</sup>

1. Grupo de Ingeniería Fotónica, Universidad de Cantabria, E.T.S.I.I.T. Av. De Los Castros s/n 39005 Santander, Cantabria, España

Persona de contacto: Rafael ([hidalgor@unican.es](mailto:hidalgor@unican.es)).

#### RESUMEN:

En este trabajo, se emplea la relación señal-ruido (SNR) con el objetivo de cuantificar la bondad de algunas de las técnicas de procesamiento de imágenes termográficas, tales como, el contraste absoluto diferencial, los algoritmos basados en Skewness y Kurtosis, análisis mediante termografía pulsada de fase, análisis por componentes principales y reconstrucción de señales termográficas. El análisis de calidad de resultados para estas técnicas se establece a partir de los valores del parámetro SNR, evaluado para los defectos presentes en el espécimen analizado, permitiendo cuantificar y comparar la identificación de los mismos así como, la calidad de los resultados de la técnica empleada.

**Palabras clave:** Procesado de imágenes, Termografía infrarroja, Ensayo no destructivo, Termografía activa, SNR.

#### ABSTRACT:

In this paper, the use of a signal to noise ratio (SNR) is proposed for the quantification of the goodness of some selected processing techniques of thermographic images, such as differentiated absolute contrast, skewness and kurtosis based algorithms, pulsed phase transform, principal component analysis and thermographic signal reconstruction. The quality of the results is established on the basis of the values of the parameter SNR, assessed for the present defects in the analyzed specimen, which enabled to quantify and compare their identification and the quality of the results of the employed technique.

**Key words:** Image processing, Infrared thermography, Nondestructive testing, Active thermography, SNR.

### 1.- Introducción

Los ensayos no destructivos de materiales (END) mediante termografía infrarroja permiten de manera fiable y rápida el análisis de los mismos independientemente de su tamaño o forma sin alterar de forma permanente sus propiedades físicas, químicas o mecánicas. Las END mediante termografía infrarroja activa, permiten obtener la información correspondiente al material, estructura, pro-

piedades físicas y mecánicas, así como a las discontinuidades y defectos presentes en el espécimen analizado [1]. Dicha información se obtiene a partir del análisis de los termogramas obtenidos, el cual, está compuesto principalmente de tres etapas: pre-procesado, procesamiento y análisis de resultados [2-3]. La selección de las técnicas de procesamiento a emplear estará condicionada por los objetivos y necesidades del estudio. Este trabajo se cen-

tra en el estudio de las técnicas de procesado de secuencias termográficas obtenidas a partir de END mediante termografía infrarroja (TI) activa realizando cuantificación de bondad mediante la relación señal-ruido (SNR) de algunas de las principales técnicas de procesado (DAC, PPT, PCT, TSR, Skewness y Kurtosis) empleadas en el análisis de secuencias térmicas [4-6].

## 2.- Técnicas de procesado

Existen un gran número de técnicas de procesado de imagen a emplear en END mediante TI activa, la aplicación de los mismos estará condicionada por las características y objetivos presentes en el estudio a realizar. La mayoría de los algoritmos empleados en las diferentes técnicas de procesado, se han desarrollado para aquellos ensayos realizados mediante termografía activa pulsada, ya que esta constituye la técnica mas empleada, sin embargo la adaptación y modificación de los mismos permite su aplicación al resto de técnicas existentes. Estas técnicas se pueden clasificar en tres grupos principalmente, mediante contraste térmico [6], las basadas en transformadas [3] y mediante métodos estadísticos [7-8]. A continuación se desarrollaran algunas de las principales técnicas comprendidas en estos grupos.

### 2.1.- Contraste térmico

#### 2.1.1. - Contraste absoluto diferencial (DAC)

La técnica de procesado mediante el contraste absoluto diferencial (DAC) se desarrolla como solución a las limitaciones que presenta la técnica de contraste térmico absoluto, la cual se define por la diferencia entre la temperatura de un área defectuosa  $T_d$  y un área sin defectos (soundarea)  $T_{sa}$  [9], donde los resultados obtenidos están condicionados por la necesidad de localizar a priori un área libre de defectos. La técnica de procesado DAC está basada en la solución unidimensional de la ecuación de difusión de Fourier para una onda térmica pulsada (delta de Dirac). La aplicación de esta técnica de procesado (DAC) permite el modelado de los perfiles de evolución temporal de la temperatura de la superficie del espécimen obteniéndose los valores de la energía térmica cedida a la superficie en cada punto de la misma y redu-

ciendo los efectos del calentamiento no uniforme en la superficie. La limitación en el proceso de selección de  $t'$  se elimina empleando el método de automatización diseñado para esta técnica (IDAC) [3].

### 2.2.- Transformadas

#### 2.2.1. - Termografía pulsada de fase (PPT)

La termografía pulsada de fase (pulsed phase thermography) es una técnica de procesado para secuencias de imágenes capturadas mediante termografía infrarroja activa, que permite, partiendo de la transformada discreta de Fourier (DFT), cambiar del dominio temporal al frecuencial [10] la señal de la respuesta térmica contenida en la secuencia y definida de forma unidimensional. Analizando la evolución temporal de la secuencia imágenes mediante PPT, se aplica la transformada de Fourier unidimensional sobre cada pixel de la secuencia de imágenes, obteniendo dos nuevas secuencias de imágenes, amplitud y fase. Al continuar el análisis de las secuencias resultantes al aplicar el procesado mediante PPT, adquiere un especial interés la secuencia de fase o fasegrama, al ser la componente menos afectada por los efectos de degradación de la señal [11] y la que permite estimar la profundidad de los defectos presentes en el espécimen objeto de estudio.

#### 2.2.2. - Análisis por componentes principales

La técnica de procesado para secuencias de imágenes térmicas por componentes principales (PCT - Principal Component Thermography) se basa en la reducción de la información a partir de la descomposición en valores singulares (SVD - Singular Value Decomposition) para extraer información temporal y espacial de la secuencia de imágenes de forma compacta haciendo uso de funciones estadísticas ortogonales o EOF [12]. Antes de aplicar la descomposición, la secuencia de imágenes a analizar, en forma de matriz 3D es transformada en una matriz 2D. La transformación de 3D a 2D se realiza a cada imagen de la secuencia a analizar donde la dimensión temporal queda comprendida en las columnas y la dimensión espacial en las filas, de forma que la secuencia completa será una matriz 3D ( $N_x \times N_y \times N_t$  con  $N_t = n^\circ$  total de imágenes). En la descomposición de

la matriz A, las columnas de U representan el conjunto de funciones ortogonales empíricas (EOF) describiendo las variaciones espaciales y las columnas de  $V^T$ , los componentes principales que contienen las variaciones temporales.

### 2.3.- Estadísticos

#### 2.3.1. - Reconstrucción de señales

Entre las técnicas de procesamiento basadas en métodos estadísticos se encuentra la reconstrucción de señales a partir de polinomios o TSR (Thermographic signal reconstruction) empleada principalmente en el filtrado de ruido y en la reducción de datos [2]. Esta técnica parte de la ecuación unidimensional de difusión de calor de Fourier en una superficie semi-infinita que ha sido sometida previamente a una excitación térmica tipo Delta de Dirac [3]. Esta ecuación modela la evolución de la temperatura superficial de un pixel sin defectos en su escala logarítmica de forma lineal con pendiente  $-1/2$ . De esta forma, la información de la secuencia de imágenes queda reducida al número de coeficiente de regresión del polinomio empleado en la reconstrucción.

#### 2.3.2. - Skewness

La técnica de procesamiento por Skewness permite reducir toda la secuencia en una sola imagen (skewgrama), la cual contiene los valores del momento central de tercer orden o skewness de la evolución térmica de cada uno de los píxeles [7], medida de la asimetría de la distribución de probabilidad de una variable de valor real. De esta forma se determina la bondad del ajuste de los datos en referencia a un tipo específico de distribución realizando la presencia de posibles defectos e inhomogeneidades presentes en el espécimen.

#### 2.3.3. - Kurtosis

La técnica de procesamiento por kurtosis al igual que en el caso anterior, permite comprimir en una sola imagen (kurtograma) la información contenida en la secuencia de imágenes, la cual contiene, los valores del momento estadístico de cuarto orden (kurtosis) de la evolución térmica de cada uno de los píxeles de cada imagen de la secuencia original [8]. El momento estadístico de cuarto orden se define como la medida que refleja el grado en

que la distribución alcanza un máximo o pico, proporcionando de esta forma información referente a la altura de la distribución relativa al valor de su desviación estándar.

## 3.- Análisis y resultados

### 3.1.- Relación señal –ruido

El análisis mediante el valor de la relación SNR (Signal to noise ratio) aplicado a cada una de las técnicas de procesamiento mencionadas anteriormente, permite determinar cual algoritmo es más adecuado dependiendo de la aplicación. La relación SNR describe el contraste existente entre el área de un defecto y su vecindad, estableciendo un rango dinámico medido en decibelios (dB). Para ello, se seleccionan dos áreas para cada defecto, un área dentro del defecto que consideraremos como “señal” (Sarea) y un área alrededor del defecto definida como “ruido” (Narea) [7]. El cálculo del valor SNR está dado por:

$$SNR = \frac{S}{N} = 20 \log_{10} \left( \frac{\text{abs}(Sarea_{md} - Narea_{md})}{\sigma} \right) [dB] \quad (1)$$

donde  $\sigma$  es la desviación estándar del ruido y  $Sarea_{md}$  y  $Narea_{md}$  son los valores medios de cada área respectivamente.

Este método de cuantificación es independiente de cómo aparezca el defecto en el material, ya que, puede aparecer mas frio o más caliente que su vecindad pero esto no afecta al resultado debido al cálculo del valor absoluto.

### 3.2.- Resultados

El análisis de cuantificación mediante la relación señal-ruido se aplico a los resultados obtenidos al aplicar las técnicas de procesamiento de imagen seleccionadas (DAC, PPT, PCT, TSR, Skewness y Kurtosis) sobre cuatro especímenes. Los tres especímenes CFRP (fibra de carbón) y el PLEXI014 (plexiglás) fueron ensayados en reflexión mediante termografía pulsada empleando dos flases de alta potencia (6.4kJ) durante 5 ms. El proceso de conducción de calor en el material fue capturado mediante una cámara IR (3 - 5  $\mu m$ ) a una frecuencia de 157 Hz. En la figura 1 se muestra la geometría de los especímenes planos y en la figura 2 el curvado (a) y trapecoidal (b), así como la distribución de los defectos en cada uno de ellos.

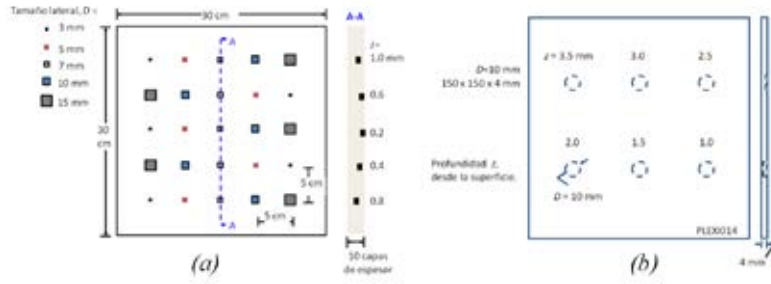


Fig. 1: Representación esquemática y localización de defectos para los especímenes planos CFRP006(a) y PLEXI014 (b).

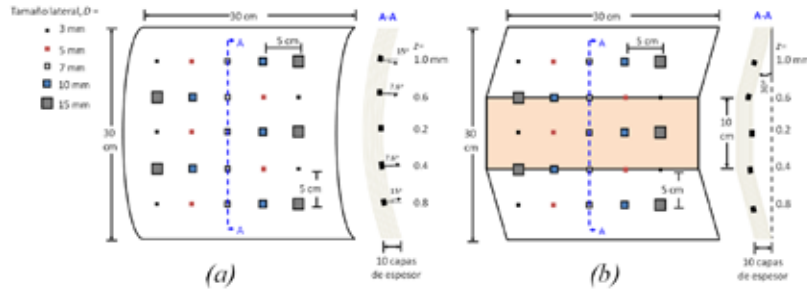


Fig. 2: Representación esquemática y localización de defectos para los especímenes CFRP007(a), CFRP008(b).

En la figura 3 se muestran los termogramas resultantes seleccionados al aplicar los procesados en CFRP006 para el cálculo de cuantificación mediante SNR. Para las secuencias de imágenes obtenidas que comprenden más de un termograma, se seleccionó el termograma donde se identificaban el mayor número de defectos y que arrojara la mayor información posible en cuanto a composición de la placa de refiere. Los termogramas seleccionados para el espécimen CFRP006 son: termograma obtenido a 1s al aplicar el DAC, los obtenidos mediante Kurtosis y Skewness,

la EOF3 mediante PCT, el termograma obtenido a la frecuencia de  $f=0.1$  Hz en la secuencia de amplitud y 0.3 Hz en la secuencia de fase y el termograma formado por los coeficientes de la quinta derivada obtenidos a partir del TSR con un polinomio de grado 5. Los termogramas resultantes seleccionados al aplicar los procesados en CFRP007 para el cálculo de cuantificación mediante SNR siguiendo los criterios establecidos para el caso anterior, fueron: DAC (termograma a 1.4 s), PCT (EOF4), PPT en amplitud (en  $f=0.1$  Hz) y fase (en  $f=0.1$  Hz) y TSR (quinta derivada).

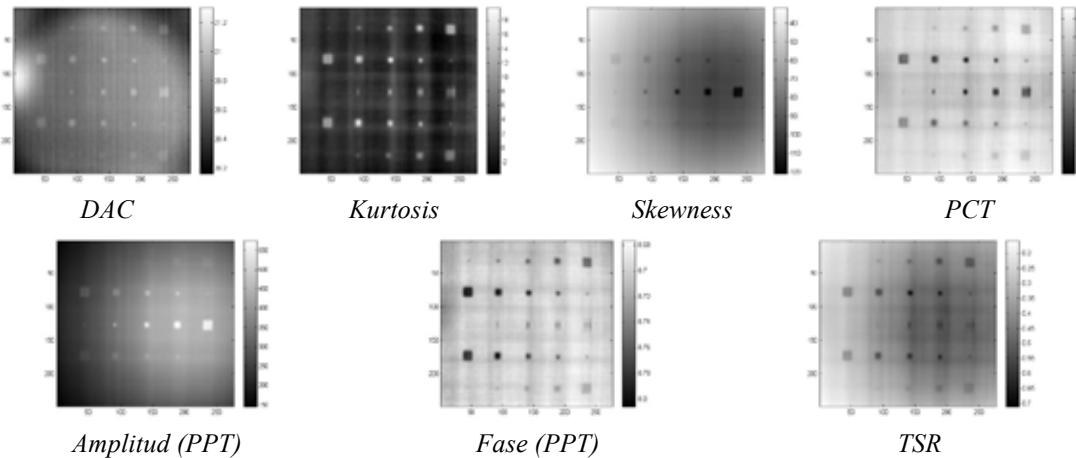


Fig. 3: Termogramas resultantes seleccionados al aplicar los procesados en CFRP006.

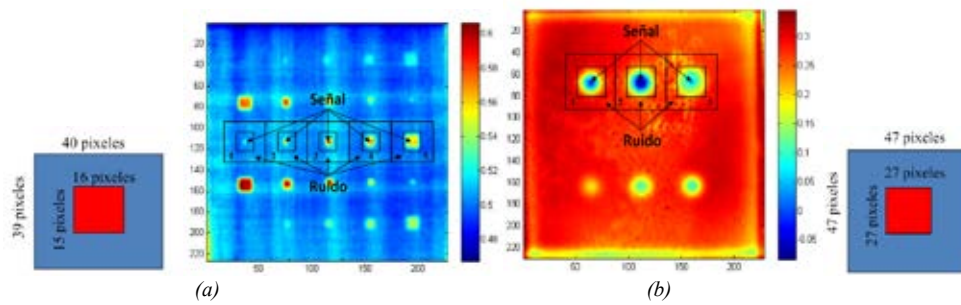


Fig. 4: Representación de las áreas seleccionadas para el análisis de cuantificación de los especímenes CFRP (a) y PLEXI014 (b).

Defecto	DAC	Skewness	Kurtosis	PCT	PPT (A)	PPT (F)	TSR
	SNR (dB)	SNR (dB)	SNR (dB)	SNR (dB)	SNR (dB)	SNR (dB)	SNR (dB)
<b>CFRP006</b>							
1	ND	ND	-27,957	-28,462	-30,902	ND	ND
2	-28,464	-0,1589	-5,2688	8,4542	-4,6162	-1,1796	-9,1104
3	-6,9364	4,0325	3,6098	12,560	4,0451	3,5273	-2,0892
4	-1,6373	7,4824	15,638	17,748	15,391	6,0931	3,0351
5	1,9723	9,1168	17,339	16,881	17,639	6,6220	6,2461
<b>CFRP007</b>							
1	ND	-5,48411	-5,3206	-4,9247	-18,3772	ND	ND
2	-28,0717	3,97411	4,9313	4,6748	-1,02852	-4,65571	ND
3	-15,0645	9,15906	10,166	7,8956	7,98469	-0,51944	0,00642
4	-7,1094	14,1176	15,321	14,756	14,3117	2,69779	2,74662
5	-6,56153	20,8197	21,954	23,33	16,4575	5,43181	3,61955
<b>CFRP008</b>							
1	ND	-2,3043	-2,2912	-3,0386	-7,5137	ND	ND
2	-12,698	10,814	9,8998	6,5088	0,1066	-24,628	-18,366
3	-1,2682	16,399	16,271	15,722	15,467	-0,3343	3,8895
4	7,9689	23,794	23,971	23,818	13,198	8,8131	1,6003
5	9,8281	20,902	20,567	19,54	13,471	6,0709	7,1653
<b>PLEXI014</b>							
1	11,611	ND	-14,845	-4,9244	-8,2767	19,345	16,397
2	11,938	-6,897	-1,74	5,7135	-2,3434	20,232	16,02
3	11,611	-1,0002	4,0645	12,025	4,783	19,251	11,569

Tabla. 1: Valores de SNR obtenidos. Sombreados los defectos identificados (SNR>0).

En el caso del espécimen CFRP008 los termogramas seleccionados fueron: DAC (termograma a 0.7 s), PCT (EOF2), PPT en amplitud (en  $f=0.1$  Hz) y fase (en  $f=0.1$  Hz) y TSR (quinta derivada). Para el espécimen PLEXI014 los termogramas seleccionados fueron: DAC (termograma a 1.3 s), PCT (EOF5), PPT en amplitud (en  $f=0.1$  Hz) y fase (en  $f=0.1$  Hz) y TSR (cuarta derivada). En la figura 4 se muestran las áreas seleccionadas para el cálculo de cuantificación mediante la relación señal-ruido. Para las secuencias de imágenes obtenidas con los especímenes CFRP de fibra de carbón, se empleo un área de 15x16 pixeles para los defectos y una de 39x40 pixeles para el ruido. En el caso del espécimen PLEXI014 de plexiglás se empleo un área cuadrada de 27x27 pixeles para los defectos y otra de 47x47 pixeles para el ruido. Los defectos han sido enumerados de izquierda a derecha. En la

tabla 1 se muestran los valores de SNR resultantes al aplicar los procesados y para cada uno de los defectos seleccionados en cada espécimen. Como se puede observar, los valores de SNR nos permiten cuantificar la identificación de los defectos al aplicar las técnicas de procesado en cada uno de los especímenes, lo cual estará también condicionado por la configuración de los mismos, ya que, los defectos con menor profundidad respecto a la superficie del material así como los de mayor tamaño, podrán ser identificados con mayor facilidad. Por lo cual, en el caso de los especímenes CFRP donde los defectos analizados se encuentran a la misma profundidad pero presentan dimensiones diferentes, los valores del parámetro SNR estarán condicionados por la dimensión y variaran de ND (en el caso de los defectos no identificados) y  $SNR < 0$  (en el caso de los defectos de menor dimensión) a  $SNR > 0$  (pa-

ra los defectos de mayor dimensión y por lo tanto mejor identificados). En el caso del espécimen PLEXI014 los valores del parámetro SNR estarán condicionados por la profundidad de los defectos, donde, los más profundos tendrán una peor relación señal – ruido ( $SNR < 0$ ) y en algunos casos dependiendo de la técnica de procesamiento aplicada no serán detectados (ND) y en los menos profundos se obtendrán mejores resultados ( $SNR > 0$ ).

#### 4.- Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos mediante el análisis de cuantificación de las técnicas de procesamiento seleccionadas aplicadas a varios especímenes de configuraciones diversas, se puede concluir que la identificación de defectos o discontinuidades estarán condicionadas por las características de las mismas y por tanto estos resultados variaran en dependencia de los métodos de procesamiento que se empleen. Independientemente, y como se puede observar en la tabla 1, los mejores resultados se obtienen en los kurtogramas, skewgramas y mediante PCT, aunque, valorando en cada caso el número de defectos detectados ( $SNR > 0$ ) y la configuración de los mismos, el método de procesamiento que ofrece mejores resultados es el análisis por componentes principales (PCT).

#### Referencias

- [1] Peter J. SHULL, "Nondestructive evaluation: theory, techniques and applications", Dekker Mechanical Engineering, CRC Press; 1st edition (May 8, 2002).
- [2] Hernán D. BENITEZ, Clemente IBARRA-CASTANEDO, Abdelhakim BENDADA, Xavier MALDAGUE, Humberto LOAIZA, Eduardo CAICEDO, "Procesamiento de imágenes infrarrojas para la detección de defectos en materiales", Tecnura, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, vol. 10, núm. 20, pp. 40-51, 2007.
- [3] Daniel A. GONZALES; "Contribuciones a las técnicas no destructivas para evaluación y prueba de procesos y materiales basadas en radiaciones infrarrojas", Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, Departamento de TEISA, 2006.
- [4] Francisco J. MADRUGA, Paula ALBENDEA, Clemente IBARRA-CASTANEDO, José M. LOPEZ-HIGUERAS, "Signal to noise ratio (SNR) comparison for lockin thermographic data processing methods in CFRP specimen", Qirt10. Quantitative Infrared Thermography, Québec, Canada, pp. 1-6.
- [5] Paula ALBENDEA, Francisco J. MADRUGA, Adolfo COBO, José M. LOPEZ-HIGUERA; "Signal to noise ratio (SNR) comparison for pulsed thermographic data processing methods applied to welding defect detection", Qirt10. Quantitative Infrared Thermography, Québec, Canada, 2010.
- [6] Joseph N. ZALAMEDA, Nikolas RAJIC, William P. WINFREE, "A comparison of image processing algorithms for thermal non-destructive evaluation", SPIE Proc. Thermosense XXV, vol. 5073, pág. 374–385, 2003.
- [7] Francisco J. MADRUGA, Clemente IBARRA-CASTANEDO, Olga M. CONDE et al., "Infrared thermography processing based on higher-order statistics", NDT & E International, volume 43, issue 8, pages 661–666, 2010.
- [8] Francisco J. MADRUGA, Clemente IBARRA-CASTANEDO, Olga M. CONDE et al.; "Enhanced contrast detection of subsurface defects by pulsed infrared thermography based on the fourth order statistic moment, kurtosis", Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng. (USA). Thermosense XXXI, 14 April 2009.7299, 72990U (8 pp.).
- [9] Xavier P.V. MALDAGUE, "Theory and Practice of Infrared Technology For Nondestructive Testing", Ed. John Wiley & Sons, New York, 684 páginas, 2001.
- [10] Clemente IBARRA-CASTANEDO, Xavier MALDAGUE, "Pulsed phase thermography reviewed", Quantitative InfraRed Thermography Journal, Volume 1, Issue 1, 2004.
- [11] Clemente IBARRA-CASTANEDO, "Quantitative Subsurface Defect Evaluation by Pulsed Phase Thermography: Depth Retrieval with the Phase", Ph. D. thesis, Université Laval, 2005.
- [12] Nikolas RAJIC, "Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures", Composite Structures, vol. 58, pag. 521-528, 2002.